Zur Bewertung der Struktur von Verkehrsnetzen

Mariusz Dudek , Technische Universität Kraków
Lorenz Hempel , Bauhaus-Universität Weimar

1. Einleitung

Die Verkehrsplanung und das Verkehrsengineering verfolgen in einem gewissen abstraktem Sinne das Ziel, einen Ausgleich zwischen den Verkehrsbedürfnissen der einzelnen Verkehrsteilnehmer und den durch das konkrete Verkehrsnetz gegebenen Möglichkeiten zu deren Befriedigung herzustellen. Die Beurteilung einer gefundenen Lösung, inwieweit sie einen solchen Ausgleich gut oder weniger gut erreicht hat, wird i.A. nach einer Analyse der sich durch diese Lösung ergebenden Verkehrsströme, Fahrzeiten, Umweltbelastungen u.a. vorgenommen. Solch Analysen sind stets mit idealisierenden Modellbildungen, Annahmen bzw. Schätzungen der für die Berechnung notwendigen Ausgangswerte und einem erheblichen numerischen Aufwand verbunden.
Es erscheint uns deshalb sinnvoll, einige Ansätze und Möglichkeiten zu diskutieren, die es erlauben, Aussagen über das gute bzw. weniger gute Funktionieren einer Verkehrslösung auf der Basis von Strukturuntersuchungen des derzeitigen oder geplanten Verkehrsnetzes zu treffen. Wir denken, daß damit ein Teil notwendigen Beurteilung bereits vorgenommen werden kann.

2. Der Zusammenhang (Kohäsion) des Netzes

Zusammenhangsuntersuchungen sind sehr geeignet zur Bewertung der Qualität der Netzstruktur. Natürlich wollen wir voraussetzen, daß ein Verkehrsnetz zusammenhängend im Sinne der Graphentheorie und daß jeder Knoten auch von jedem anderen Knoten aus erreichbar ist. Dies sind unverzichtbare Eigenschaften eines Verkehrsnetzes.
Um eine weiterreichende Bewertung der Zusammenhangsqualität vorzunehmen, sind die folgenden Parameter vorgeschlagen:

$$\mu = m - n + 1$$ (Bettie) [PT 82]

$$C_{st} = \frac{n \cdot (n-1)}{2 \cdot m}$$ (Prihar) [Pri 56]

$$\alpha = \frac{2 \cdot \mu}{(n-1) \cdot (n-2)}$$ (Kansky) [Kan 63]

$$\beta = {}^{m}\!/_{n}$$ (Kansky) [Kan 63]

$$\gamma = \frac{2 \cdot m}{n \cdot (n-1)} = \frac{1}{C_{st}}$$ (Kansky) [Kan 63]

$$G_p = \frac{n \cdot (n-1) - 2 \cdot m}{2 \cdot n}$$ (Zagoshdshon) [Zag 70],

wobei n die Anzahl der Knoten und m die Anzahl der Bögen des das Verkehrsnetz beschreibenden Graphen bezeichnet.
Die sogenannte zyklomatische Zahl μ gibt die Anzahl der in einem Graphen vorhandenen (linear unabhängigen) Zyklen an. Nur bei Kenntnis von n kann man μ zur Bewertung der

Zusammenhangsqualität heranziehen; ohne gleichzeitige Kenntnis von n läßt es keinerlei Schlußfolgerungen zu.
Die anderen angegebenen Parameter liefern etwas mehr Information, machen aber nur Aussagen im Sinne von statistischen Mitteln über das Netz. Informationen über Engpässe, Nadelöhre oder Schwachstellen im Netz kann man aus ihnen nicht gewinnen. Man kann Netze mit recht unterschiedlichen Zusammenhangsqualitäten angeben, die alle dieselben Parameter haben.
Will man diesen Nachteil beheben, muß man andere Parameter heranziehen. Eine Möglichkeit ist z.B. die „Kantenzusammenhangsmatrix" *ZHK*, deren Elemente $zhk(i,j)$ zu einem geordneten Knotenpaar (i,j) die Minimale Anzahl von Kanten angibt, die aus dem Graphen entfernt werden müssen, damit sein Zusammenhang so verloren geht, daß i und j getrennt sind. Bezeichnet $val(i)$ die Anzahl von Kanten, mit denen der Knoten i inzident ist, so gilt offenbar

$$zhk(i,j) \leq min\ (\ val(i)\ ,val(j)\ ) = zhko(i,j)\ .$$

Mit der Matrix $K = ZHKO - ZHK = (\ zhko(i,j) - zhk(i,j)\ )$ hat man dann Informationen über Engpaßsituationen zwischen den Knotenpaaren. Je größer das Matrixelement, desto kritischer die Verbindung zwischen den zugehörigen Knoten. Als eine gewisse Verdichtung kann man das arithmetische Mittel aller Matrixelemente benutzen.

$$Km = \frac{1}{n^2} \cdot \sum_{i,j=1}^{n} \left[zhko(i,j) - zhk(i,j) \right]$$

Eine andere Möglichkeit ergibt sich, wenn man die Länge des kürzesten Weges in Beziehung setzt zur notwendigen Umweglänge bei Weglassen (Streichen) eines Bogens des kürzesten Weges.
Bezeichnet $w(i,j) = (k_1, k_2,..,k_n)$ die Bogenfolge des kürzesten Weges und $w^s(i,j)$ die Länge des kürzesten Weges von i nach j, der den Bogen k_s nicht benutzt, so ergibt sich mit

$$u(i,j) = \max_{s=1,\dots,r} w^s(i,j)$$

und $\quad v(i,j) = u(i,j) - w(i,j)$

ein Maß für die Zusammenhangsqualität des Knotenpaares (i,j) . Kleines $v(i,j)$ zeigt eine gewisse Unempfindlichkeit der Verbindung von i nach j gegenüber Sperrungen einzelner Straßen an; großes $v(i,j)$ dagegen eine sehr starke Empfindlichkeit. Dabei ist es durchaus sinnvoll, alle Kanten des Netzes mit der Länge 1 zu bewerten, d.h. $w(i,j) = r$ zu setzen. Natürlich sind auch andere „Längenbewertungen" möglich, z. B. die tatsächliche Länge einer Straße oder die Fahrzeit durch diese Straße, aber ihre Verwendung dürfte den Aussagewert von $v(i,j)$ kaum erhöhen.
Als ein Maß für das gesamte Netz wären dann verwendbar

$$V = \max_{i,j=1,\dots,n} v(i,j)$$

oder $\quad \overline{V} = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^{n} v(i,j)\ .$

Die Berechnung der Größen *zhk(i,j)* und *v(i,j)* ist in Polynomzeit möglich und erfordert die Lösung von Maximalstrom- bzw. kürzesten Weg-Problemen.

3. Die Unabhängigkeit der einzelnen Verkehrsarten

Straßenverkehrsanlagen sind für die Nutzung durch mehrere Verkehrsarten vorgesehen. Dadurch sind die Verkehrsarten miteinander verknüpft und beeinflussen sich in ihrem Ablauf gegenseitig. Ein flüssigerer Verkehrsablauf kann u.a. durch Entkopplung der Verkehrsarten erreicht werden. Entkopplung ist in räumlicher und in zeitlicher Weise möglich. Ein zeitliche Entkopplung ist u.E. nur für den Versorgungsverkehr sinnvoll; man kann ihn zu den Zeiten abwickeln, zu denen die anderen Verkehrsarten nur wenig Belastung der Straßen mit sich bringen (am häufigsten an Nacht- Abend- oder Morgenstunden).
Für die räumliche Entkopplung ist unmittelbar einzusehen, daß sie vorteilhaft ist. Leider läßt sie sich in einem gegebenen Netz (besonders in Stadtzentren) nicht immer realisieren, ohne andere Nachteile in Kauf zu nehmen.
Eine Bewertung des Unabhängigkeitsgrades zweier Verkehrsarten kann einmal durch die gemeinsam genutzten Kanten des Verkehrsnetzes oder auch die Länge der gemeinsam genutzten Kantenabschnitte (Straßenabschnitte) erfolgen, aber zum anderen auch durch die Anzahl von Kreuzungen mit unterschiedlichen Verkehrsarten. Bezeichnen a und b zwei verschiedene Verkehrsarten, $G = (V.\ A)$ den Graphen, der das Verkehrsnetz widerspiegelt, $L(k)$ die Länge eines Bogens k aus A , $L(k,a,b)$ die Länge des von a und b gemeinsam genutzten Bogenstücks, $A(a)$ die Menge der von a genutzten Bögen , $Z(a)$ die Mächtigkeit von $A(a)$ und $Z(a,b)$ die Anzahl der von a und b gemeinsam genutzten Bögen, so hat man die Werte

$$UB(a,b) = \frac{Z(a,b)}{Z(a)} \qquad \text{,bzw.}$$

$$UL(a,b) = \frac{\sum_{k \in A} L(k,a,b)}{\sum_{k \in A(a)} L(k)} \quad .$$

Bei r verschiedenen Verkehrsarten bilden diese Werte die beiden $r \times r$-Matritzen **UB** und **UL** , die nicht notwendig symmetrisch und deren Hauptdiagonalelemente gleich 1 sind .
Analog kann man bezüglich der gemeinsamen Kreuzungen

$$UK(a,b) = \frac{ZK(a,b)}{ZK(a)}$$

benutzen, wobei $ZK(a,b)$ bzw. $ZK(a)$ die Anzahl der von a und b bzw. die von a genutzten Bögen angibt und diese Werte wieder zu einer $r \times r$-Matrix **UK** zusammengestellt werden können.

4. Die Komplexität der Kreuzungen im Netz

Die Fahrzeiten in einem städtischen Verkehrsnetz werden ganz wesentlich auch von den Wartezeiten an den Kreuzungen beeinflußt. Nicht selten stellen gerade die Kreuzungen die Nadelöhre eines Verkehrssystems dar. Unabhängig von der Art der Kreuzung (ampelgeregelt, vorfahrtsgeregelt oder gleichberechtigt) sind die Wartezeiten unmittelbar von der Anzahl der die Kreuzung nutzenden Verkehrsarten und -richtungen beeinflußt. Entlastung der Kreuzungen bedeutet also auch Reduktion der Verkehrsarten und -richtungen, die die Kreuzung nutzen. Fußgänger und Radfahrer lassen sich durch Überwege oder Fußgängertunnel aus dem Kreuzungsgeschehen herausnehmen. Wenn es gelingt, die ÖPNV-Linien weitestgehend so zu legen, daß eigene Wege benutzen, so ist an vielen Kreuzungen der ÖPNV nicht mehr oder nur noch in ausgewählten Richtungen beteiligt. Das ermöglicht auch flüssigen und von anderen Autos ungestörten Verkehr der öffentlichen Fahrzeuge.

Eine weitere, wenn auch sehr einschneidende, Möglichkeit die Komplexität von Kreuzungen zu reduzieren, ist gegeben, wenn alle Straßen als Einbahnstraßen benutzt werden. Eine Kreuzung zweier Einbahnstraßen ist signifikant einfacher zu regeln und verursacht deutlich geringere Wartezeiten als eine Kreuzung zweier in beiden Richtungen befahrener Straßen. Das ist lokal sofort offensichtlich, aber auch bei globaler Betrachtung sind die Vorteile geringerer Wartezeiten an den Kreuzungen gegenüber dem Nachteil etwas längerer Wege bis zum Ziel einer Fahrt duraus einer Überprüfung wert. Daß Straßen, die nur in einer Richtung genutzt werden, auch noch zusätzliche Möglichkeiten für den ruhenden Verkehr bieten, sei nur nebenbei erwähnt.

5. Andere Strukturparameter

Für die Akzeptanz und Effizienz von Verkehrsnetzen ist die Zügigkeit des Vorwärtskommens im Netz von Wichtigkeit, das sowohl für den ÖPNV als auch für den motorisierten Individualverkehr. Bezüglich des ÖPNV ist eine geeignete Maßzahl eines gegebenen Netzes von ÖPNV-Linien die maximale Anzahl von Linienwechseln, die für eine Fahrt von einem beliebigen Startknoten zu einem beliebigen Zielknoten entlang des kürzesten Weges zwischen diesen Knoten notwendig sind. Für den motorisierten Individualverkehr ist in analoger Weise die Anzahl der Wechsel von einer Hauptstraße auf eine andere - wenn Hauptstraßen z.B. dadurch gekennzeichnet sind, daß auf ihnen „grüne Wellen” oder andere vorteilhafte Verkehrssteuerungs - Maßnahmen existieren - eine brauchbare Maßzahl. Bezeichnet $Anz(w(i,j))$ die Anzahl von Wechseln entlang des Weges $w(i,j)$ von Knoten i nach Knoten j und $W(i,j)$ die Menge aller Wege von i nach j, so sei

$$Az(i,j) = Min\{Anz(w(i,j)) : w(i,j) \in W(i,j)\}.$$

Eventuell kann man dabei die Länge $L(w)$ der zulässigen Wege w noch einschränken, z.B. durch die Bedingung $L(w) < c \times L(w^{opt})$, wenn w^{opt} den kürzesten Weg bezüglich einer geeigneten Bewertung der Bögen (Länge in km, Fahrzeit, o.a.) bezeichnet und c eine Toleranzkonstante mit $c > 1$ ist. Dann hätte man

$$Az(i,j) := \{Anz(w(i,j)) : w(i,j) \in W(i,j), L(w(i,j)) < c \cdot L(w^{opt}(i,j))\}.$$

Bezüglich des gesamten Verkehrsnetzes wäre dann das Maximum aller $Az(i,j)$ ein geeigneter Parameter zur Bewertung der Netzqualität. Je kleiner dieses Maximum um so besser die Netzstruktur.

Es gibt eine Strukturform von Netzen, in der dieser Parameter den Wert 2 hat; das ist die sogenannte „Ring-Radius-Struktur“. Darunter wird in Anlehnung an die rein geometrische Ring-Radius-Struktur eine Einteilung der Bögen des Netzes in zwei disjunkte Teilmengen verstanden,

wobei die eine Teilmenge eine Schar geschlossener Wege (Ringe) bildet, die sich paarweise nicht überschneiden, d.h. paarweise keinen Knoten gemeinsam haben. Die andere Teilmenge der Bögen bilden paarweise bogendisjunkte Wege, so daß jeder dieser Wege (Radien) jeden Ring genau einmal schneidet, d.h. genau einen Knoten mit ihm gemeinsam hat.
Eventuell kann man bei dieser Unterteilung der Bögen auch die Bögen untergeordneter Bedeutung (sie entsprechen Straßen, die z.B. Wohngebiete an größere Straßen anschließen, o.ä.) herauslassen, dann würde eine solches Ring-Radius-Struktur nur unter den größeren Straßen ausgeprägt.

6. Abschlußbemerkungen

Die hier unterbreiteten Vorschläge zur Bewertung der Struktur von Verkehrsnetzen sind aus einer gemeinsamen Diskussion der Möglichkeiten dazu hervorgegangen. Sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Einige Vorteile einer solchen Betrachtungsweise sind offensichtlich. Inwieweit diese Bewertungen eine sinnvolle Ergänzung der bisherigen Methoden bedeuten oder inwieweit sie sogar für erste Vorentscheidungen bei der Rekonstruktion oder Erweiterung bestehender Verkehrsnetze ausreichend sind, müssen zukünftige, detailliertere Untersuchungen zeigen.

Literatur:

[Kan 63] K.J. Kansky ; Structure of transport networks: relationships between network geometry and regional characteristics. Research Papers No. 84, University of Chicago, Department of Geography, 1963.

[Pat 90] M. Patriksson ; Algorithms for traffic equilibria. Departmentof Mathematics, Institut of Technology, Linköping University, Sweden, 1990

[Pri 56] Z. Prihar ; Topological properties of telecomunications networks. In: Proceedings of Institute of Radio Engineering, No. 44, 1956, S. 923 ff

[PT82] M. Potrykowski, Z. Taylor ; Geografia transportu - zarys problemów, modeli i metod badawczych. PWN, Warszawa, 1982, S. 98 ff.

[Sed91] R. Sedgewick ; Algorithmen. Bonn,München Reading/Mass. Addison-Wesley, 1991

[Ward] J.G. Wardrop ; SomeTheoretical aspects of road traffic research. In: Proceedings of the Institut of Civil Engineering, part II, S. 325 ff

[Zag 70] A. Zagoshdshon ; Metody grafowe w badaniach osadnictwa. Przegl¹d Geograficzny, No. 72, 1970